

Diseño de una Plataforma Docente para el Estudio de los Sistemas de Recolección de Energía (*Energy Harvesting*) en los Grados de Ingeniería

Herminio Martínez-García

Department of Electronics Engineering
Barcelona College of Industrial Engineering (EUETIB)
Technical University of Catalonia (UPC). BarcelonaTech
C/ Comte d'Urgell, 187. 08036 Barcelona (Spain)
Tel.: +34.93.413.72.90, Fax: +34.93.413.74.01, E-mail: herminio.martinez@upc.edu

Resumen. El presente artículo presenta el diseño e implementación física de una plataforma docente recolectora y acondicionadora de energía práctica para aplicaciones de *energy harvesting*. Concretamente, muestra la realización de un sistema de acondicionamiento de energía solar fotovoltaica a partir de un modelo concreto de panel solar. Con el fin de conseguir una plataforma lo más eficiente posible, se ha implementado un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) del panel fotovoltaico que optimiza el rendimiento del mismo, adentrando, a su vez, al estudiante de Ingeniería en este tipo de algoritmos. Además, la plataforma recolectora posee regulación de salida, ofreciendo así una tensión de salida constante, independientemente tanto de variaciones de carga como de la tensión de entrada.

Palabras llave

Algoritmos de seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT), control PWM, conversión DC-DC, convertidor *buck*, *energy harvesting*, paneles fotovoltaicos.

1. Introducción

Actualmente, el suministro y alimentación de energía eléctrica se ha convertido en una prioridad en el campo de los sistemas electrónicos debido a limitación que supone en cuanto a la autonomía, el peso o las dimensiones de cualquier equipo portátil. Es por este motivo que durante los últimos años han empezado a plantearse alternativas con el objetivo de mejorar este aspecto, y el mejor ejemplo son los sistemas de recolección de energía parásita o ambiental (lo que se conoce con el término inglés de *energy harvesting*).

La recolección de energía consiste al aprovechar la energía que proporciona el entorno con el objetivo de alimentar un circuito o sistema electrónico. De hecho, podríamos describir el *energy harvesting*, también conocido como *energy scavenging*, como el proceso de obtener una cantidad de energía proveniente de una o más fuentes existentes en la naturaleza, transformarla en energía eléctrica, acumularla o almacenarla (si fuera el caso), para, finalmente, poder alimentar una aplicación concreta. De este modo, la energía que típicamente se

disipa en el entorno es recolectada y aprovechada para alimentar un sistema o equipo electrónico, permitiendo así alargar su vida útil, complementando la fuente de energía primaria (generalmente proveniente de pilas o baterías), o, incluso, consiguiendo una aplicación autoalimentada (*self-powered*); es decir, un sistema electrónico totalmente autónomo con vida idealmente ilimitada.

Existe una gran diversidad de energías en el entorno que pueden ser recolectadas de forma eficiente como por ejemplo la energía mecánica, térmica, lumínica, acústica, electromagnética, etc., y la utilización de una u otra energía como fuente de alimentación dependerá siempre de la situación en que se encuentre la aplicación final a implementar. La ventaja de estas fuentes es que son virtualmente inagotables y no producen, en principio, ningún efecto medioambiental negativo.

Este trabajo se centra en las aplicaciones sobre recolección de energía (*energy harvesting*), dirigidas especialmente a estudiantes de últimos cursos (que cursan asignaturas optativas) de los actuales Grados de Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática, Ingeniería Eléctrica, e Ingeniería de la Energía impartidos actualmente en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona (EUETIB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) dentro del marco del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), más conocido como marco de Bolonia. No obstante, la parte experimental presentada en el presente trabajo puede adaptarse a otros niveles educativos (primeros cursos de diferentes titulaciones de Grados de Ingeniería, o incluso Bachilleratos).

Mediante el estudio del estado del arte de esta creciente tecnología se pretende dar a conocer a los estudiantes el abanico de posibilidades que ofrece este método de recolección, así como las características principales de su diseño. El presente artículo se estructura de la siguiente manera: la Sección II contextualiza el trabajo llevado a cabo dentro del entorno docente; el apartado III describe el sistema a realizar por los estudiantes; en las Secciones IV y V se muestran, respectivamente, el diseño y la implementación del prototipo llevado a cabo. Finalmente,

el apartado VI presenta las principales conclusiones del artículo.

2. Contextualización del Trabajo Llevado a Cabo

Generalmente, un sistema de recolección de energía está formado por cinco grandes bloques o subsistemas (figura 1):

- *Subsistema transductor o de conversión de energía:* es el encargado de transformar la energía proveniente del entorno en energía eléctrica.
- *Subsistema de acondicionado o de adaptación de energía:* se encarga de recoger con la máxima eficiencia posible la energía eléctrica proveniente del transductor.
- *Subsistema de conversión DC-DC:* adecúa tensiones e intensidades desde la entrada de recolección de energía hasta el sistema de almacenamiento y/o aplicación final.
- *Subsistema de almacenamiento:* permite almacenar energía con el objetivo de abordar la asincronía existente entre el acceso y el consumo de ésta (no siempre necesario).
- *Subsistema de gestión de energía:* establece las políticas a alto nivel de gestión de la energía eléctrica obtenida, haciendo especial énfasis en la conservación total de ésta.

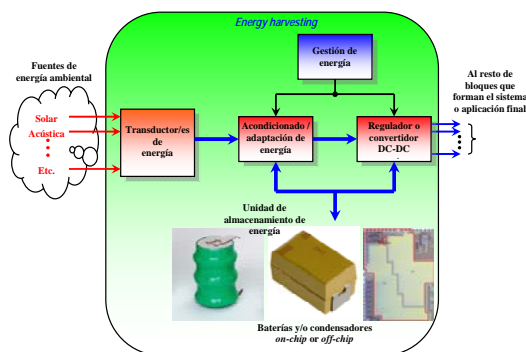


Fig. 1. Diagrama de bloques general de un sistema *energy harvesting*.

Partiendo de un panel fotovoltaico concreto (subsistema transductor), el objetivo del presente trabajo ha sido el diseño y la implementación de los subsistemas de acondicionado de energía, conversión DC-DC con regulación de salida, y gestión de energía. En esta ocasión, se ha prescindido del subsistema de almacenamiento puesto que la posible asincronía por falta de irradiancia solar no es crítica para la aplicación que se ha llevado a cabo. De este modo, la energía entregada por el panel fotovoltaico es tratada por el sistema de acondicionado de energía para aprovecharla al máximo mediante un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia o MPPT (*maximum power point tracking*) [1]–[3]. A continuación, esta energía es a su vez tratada por el sistema de conversión encargado de fijar una tensión de salida constante. Finalmente, el sistema de gestión se encarga de controlar ambos sistemas (acondicionado de energía y regulador de salida), así como de ahorrar recursos siempre que sea

posible.

La idea es que los estudiantes de los actuales Grados de Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática, Ingeniería Eléctrica, e Ingeniería de la Energía impartidos actualmente en la EUETIB de la UPC puedan llevar a cabo, en una asignatura optativa, y convenientemente tutorizados y guiados, la implementación de la mencionada plataforma docente. No obstante, la parte experimental presentada en el presente trabajo puede adaptarse a otros niveles educativos (primeros cursos de diferentes titulaciones de Grados de Ingeniería, o incluso Bachilleratos).

3. Descripción General del Sistema

Antes de empezar el diseño del sistema es esencial conocer las características del panel fotovoltaico del que se dispone, la energía del cual dependerá la alimentación de todos los dispositivos que forman la plataforma recolectora. Para este proyecto se ha dispuesto del modelo de panel solar SX310J, del cual se ha obtenido la curva característica I-V mediante el simulador Sun Simulator 350i de SPI (figura 2).

Los resultados de la simulación han permitido conocer características del panel tan importantes como la tensión en circuito abierto (22 V), la intensidad en cortocircuito (620 mA), la resistencia serie y paralelo que ofrece (3,41 Ω y 687,21 Ω , respectivamente), o la máxima potencia que es capaz de entregar en su punto óptimo de trabajo (10,48 W). En ese punto, marcado con una cruz en la curva I-V de la figura 2, el panel ofrece una tensión de 18.25 V y una corriente de 574 mA. La eficiencia mediana del panel es del 9%, aunque puede llegar hasta el 15.48%.

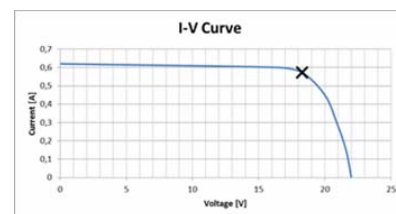


Fig. 2. Curva característica I-V del panel fotovoltaico.

A partir de la curva característica obtenida, es posible extraer la curva P-V (figura 3), necesaria para determinar su punto de máxima potencia del panel (MPP). Del mismo modo que para la curva I-V, este punto se encuentra indicado mediante una cruz en la mencionada figura.

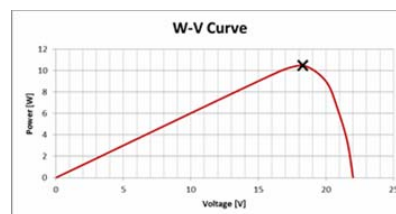


Fig. 3. Curva característica P-V del panel fotovoltaico.

Para el correcto procesado de la energía, la energía

extraída por el panel solar debe procesarse adecuadamente mediante un convertidor DC-DC controlado por un algoritmo que haga que se pueda extraer la máxima energía posible mediante el seguimiento del máximo punto de potencia del panel, gracias al seguimiento del MPP del panel. Por tanto, es una técnica utilizada para obtener la máxima potencia posible de los módulos fotovoltaicos dada su curva I-V no lineal (figura 2). El MPPT consiste en aplicar en todo momento una resistencia equivalente de carga al panel según las condiciones de irradiancia de las células solares para obtener la máxima potencia ante cualquier situación ambiental o meteorológica. En otras palabras, consiste en definir la corriente que debe extraerse del panel fotovoltaico para trabajar en el punto de potencia óptimo.

Una vez analizadas las características del panel fotovoltaico es preciso determinar un sistema de acondicionamiento que permita recolectar con la máxima eficiencia posible la energía eléctrica recibida. Para ello se requiere un convertidor conmutado DC/DC, el cual permite variar la tensión de salida de forma sencilla y con un alto rendimiento, hecho imprescindible para este tipo de aplicaciones.

Como es sobradamente conocido, existen tres tipologías básicas de convertidores conmutados DC/DC: los convertidores reductores (*buck* o *step-down*), los convertidores elevadores (*boost* o *step-up*), y los convertidores elevadores-reductores, un “híbrido” de los dos anteriores conocido comúnmente como *buck-boost*. Estos tipos de convertidores son capaces de transformar la energía eléctrica por medio de transistores conmutados a frecuencias típicamente entre 50 kHz y 1 MHz y, al contrario de los reguladores lineales, ofrecen un alto rendimiento. Por el contrario, la conmutación de alta frecuencia genera un ruido eléctrico (interferencias electromagnéticas) muy problemático en según qué aplicaciones sensibles a estas interferencias.

La frecuencia de la señal de control PWM se corresponde con el inductor y determina el rizado de la corriente. Mayores frecuencias de conmutación resultan en valores de inductancia más pequeños y, por lo tanto, componentes magnéticos menores. No obstante, dan lugar a mayores pérdidas de conmutación en el transistor, luego la disipación de potencia aumenta.

Uno de los requerimientos de este trabajo consiste en la obtención de una tensión de salida constante de 5 V. Teniendo en cuenta que el panel fotovoltaico ofrecerá entre 10 V y 22 V en función de la irradiancia disponible, es necesario reducir la tensión hasta los 5 V deseados. Por esta razón, el convertidor conmutado DC/DC escogido ha sido del tipo reductor (*buck*). En la figura 4 se puede observar el convertidor en cuestión. Existen dos modos de funcionamiento: continuo y discontinuo. Se dice que el convertidor trabaja en modo continuo si la corriente que pasa a través del inductor L no baja nunca a cero durante el ciclo de conmutación. En este caso, si las condiciones de tensión proporcionada por el panel solar y de corriente de carga son adecuadas, el convertidor trabajará siempre de forma continua, proporcionando a la

salida una tensión reducida en función del ciclo de trabajo (DC) de la señal aplicada al conmutador S :

$$V_o = DC \cdot V_i \quad (1)$$

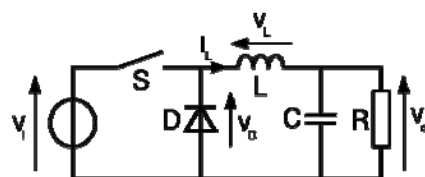


Fig. 4. Convertidor reductor conmutado (*buck*).

Como hemos comentado, para el correcto procesamiento de la energía, el convertidor DC-DC conlleva la existencia de un control de seguimiento del máximo punto de potencia. Existen tres tipos principales de algoritmos MPPT: perturbación y observación (P&O), conductancia incremental y el método de tensión constante. Para la realización del presente trabajo se ha escogido el método de perturbación y observación. El algoritmo P&O varía la tensión del panel solar en una dirección determinada y monitoriza la potencia resultante. Si la potencia medida es mayor a la medida previamente, se continúa variando la tensión en la misma dirección de la gráfica I-V. En caso contrario, se varía la tensión en sentido opuesto. De esta forma, se realiza un seguimiento de la curva P-V (figura 3) hasta encontrar el punto de máxima potencia. Una vez detectado este punto, el punto de trabajo del panel oscilará en torno a él. La figura 5 muestra las cuatro situaciones contempladas por algoritmo P&O en función de la situación del punto de trabajo en cada caso.

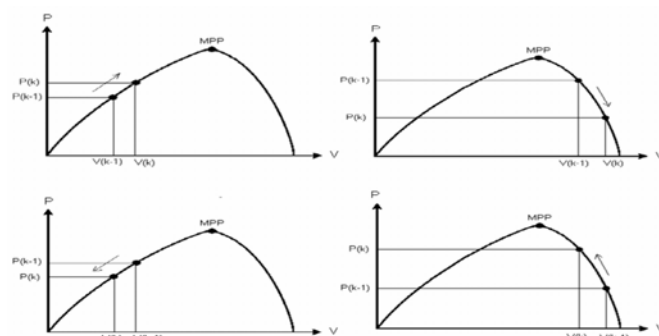


Fig. 5. Situaciones contempladas por el algoritmo P&O.

4. Diseño del Sistema

A continuación se describirán por separado las diferentes partes que forman el sistema llevado a cabo para la gestión de energía eléctrica proporcionada por el panel fotovoltaico. Dada la voluntad de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia y, al mismo tiempo, regular una tensión constante de salida, se ha optado por la implementación de dos convertidores reductores conmutados. Se describen también los *drivers* utilizados para el control de los dos convertidores, el microcontrolador y su sistema de alimentación, y, finalmente, el bloque de sensado del sistema. La figura 6 muestra el diagrama de bloques del sistema diseñado,

donde el bloque de color verde simboliza la gestión realizada por el microcontrolador utilizado en la aplicación.

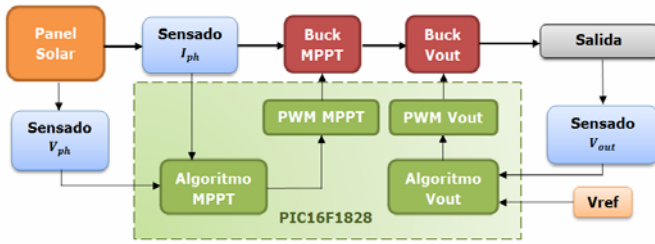


Fig. 6. Diagrama de bloques del sistema.

A. Convertidores Reductores Conmutados

Una parte trascendental del sistema se centra en el diseño de los dos convertidores *buck* que se encargan del acondicionado y regulación de la tensión procedente del panel solar. El elemento más crítico de los convertidores es el dispositivo de conmutación, pudiendo ser un transistor BJT, IGBT o bien un MOSFET. Generalmente, debido a la elevada velocidad de conmutación en este tipo de aplicaciones se acostumbra a utilizar un transistor tipo MOSFET de enriquecimiento de canal N. No obstante, en este caso resulta más sencillo y fácil de implementar un MOSFET de enriquecimiento de canal P, puesto que uno de canal N requeriría un circuito de control de puerta que incorporara un método para gestionar la tensión de puerta sobre la fuente. Para esta aplicación, el coste de implementación de un MOSFET de canal N es mucho mayor que utilizando uno de canal P, a pesar de que la conmutación de éstos no sea tan rápida y las pérdidas aumenten ligeramente. Un factor a tener en cuenta es que la tensión que verá la carga será inversa a la señal de control aplicada en la puerta. Una vez analizados varios factores como la tensión y corriente máxima que debe soportar o la resistencia entre drenador y surtidor, el transistor escogido ha sido el MOSFET de enriquecimiento de canal P modelo MTP50P03HDL.

Por otro lado, se ha decidido trabajar con un diodo Schottky SB540, el cual cumple con los requisitos de tensión y corriente máximos y ofrece una rapidez de conmutación elevada y una baja caída de tensión en directa.

Para el cálculo de los inductores y condensadores a utilizar en ambos convertidores se ha tenido en cuenta una frecuencia de conmutación de 40 kHz y se ha establecido un porcentaje de variación de corriente y tensión máximos (5% y 0.5% respectivamente).

B. MOSFET Drivers

En la mayoría de los circuitos con MOSFET, el objetivo es activarlo tan rápido como sea posible para minimizar las pérdidas por conmutación. Para conseguirlo, el circuito controlador de la puerta debe ser capaz de aportar la suficiente corriente para incrementar rápidamente la tensión de puerta al valor requerido. Para

cortar el transistor, la tensión puerta-surtidor V_{GS} debe reducirse de forma inversa a la realizada para activarlo. Para este proyecto se ha escogido un *driver* CMOS modelo TC4432CPA no inversor, adecuado para aplicaciones de conducción *high-side*, como es el caso. Presenta una elevada corriente de salida y un amplio rango de tensión de alimentación, hecho que permite alimentarlo directamente del panel fotovoltaico. La función de este dispositivo será recibir la señal PWM proveniente del microcontrolador (tanto la señal MPPT como la de regulación de los 5 V de salida) y atacar los dos transistores de cada convertidor para controlar su activación y corte.

C. Microcontrolador

En los sistemas de gestión de energía para aplicaciones de *energy harvesting*, aplicaciones fotovoltaicas, y en general en sistemas de procesamiento y gestión de energía, el controlador, como subsistema de gestión, forma parte primordial de todo el sistema [4]–[5]. El microcontrolador a utilizar en esta aplicación ha de cumplir dos requisitos básicos: un mínimo de tres canales analógicos con posterior conversión ADC, y dos salidas PWM. Además, es deseable que disponga de oscilador interno para minimizar las conexiones del circuito, así como una memoria *flash*. También se ha tenido en cuenta la resolución de los convertidores de los canales analógicos y de las salidas de modulación por ancho de pulso.

Debido a la actual popularidad de los microcontroladores PIC de Microchip, y teniendo en cuenta los requisitos mencionados se ha escogido trabajar con un modelo de esta familia. El microcontrolador escogido para el control de todo el sistema (concretamente el modelo PIC16F1828) es un modelo PIC de bajo consumo y altas prestaciones de la empresa Microchip®, ideal para este tipo de aplicaciones de bajo consumo y baja tensión [6]–[8]. Dispone de un oscilador interno de precisión de 32 MHz, un rango de operación entre 1.8 V y 5.5 V, la posibilidad de ser programado *in-circuit*, modo *sleep*, dos canales ADC de 10 bits y dos módulos PWM.

D. Bloque de sensado

Tal como se ha comentado en apartados anteriores, es necesario realizar diferentes medidas para que el microcontrolador pueda gestionar tanto el algoritmo MPPT como la regulación de la tensión de salida. Para la realización del seguimiento del máximo punto de potencia se requiere medir la tensión y la corriente generadas por el panel fotovoltaico, mientras que para mantener la tensión de salida constante es necesario medir dicho voltaje.

Para el sensado de las dos tensiones se han diseñado dos divisores de tensión para fijar la tensión de entrada máxima del convertidor analógico-digital del microcontrolador teniendo en cuenta un margen de conversión entre 0 y 5 V.

Por otro lado, para el sensado de la corriente generada

por el panel fotovoltaico se ha utilizado una resistencia *shunt* de $10\text{ m}\Omega$ junto a un sensor de corriente amplificador MAX4372FEUK-T capaz de generar un voltaje proporcional a la intensidad que circula por la resistencia. Este sensor también puede ser alimentado directamente del panel solar puesto que su rango de operación es de 2.7 V a 28 V .

5. Implementación del Sistema

El primer paso para la implementación ha consistido en la comprobación del correcto funcionamiento de los dos convertidores conmutados mediante simulaciones. Después se ha verificado la funcionalidad de las diferentes partes del sistema por separado en una placa de pruebas. Llegado a este punto, se ha procedido a la realización del esquema global del circuito, a partir del cual se ha diseñado la placa de circuito impreso (PCB). Por último, el proyecto efectuado por los estudiantes ha finalizado en el proceso experimental seguido para la implementación y posterior comprobación del funcionamiento de la plataforma recolectora junto al panel fotovoltaico.

En primer lugar se ha simulado el comportamiento del convertidor *buck* encargado del MPPT. Debido a la dificultad de simulación del comportamiento real de un panel fotovoltaico, se ha optado para simular el voltaje en operación ideal mediante una fuente de continua de 18 V . La resistencia de carga aplicada al circuito se ha ido variando para observar el comportamiento del convertidor en cada caso. Se ha decidido trabajar con una frecuencia de conmutación PWM de 40 kHz para equilibrar el tamaño del inductor y la disipación de potencia en el MOSFET de canal P debido a las pérdidas de conmutación. La figura 7 muestra la simulación realizada aplicando un ciclo de trabajo del 50% a una frecuencia de 40 kHz y una carga de $5\text{ }\Omega$. Se puede observar que la tensión de salida queda reducida aproximadamente a la mitad y la intensidad en la carga es de 1.74 A .

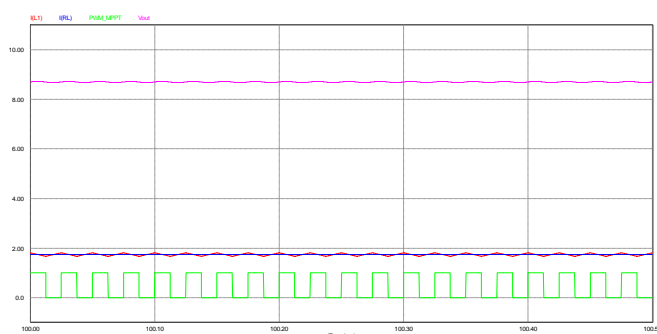


Fig. 7. Tensión de salida (traza fucsia), intensidad de salida (azul), corriente a través del inductor (rojo) y señal PWM (verde).

En ambos casos se ha comprobado que tanto el rizado de la corriente a través del inductor como el de la tensión de salida no superen los márgenes previamente establecidos.

El esquema completo del circuito (figura 8) muestra la

conexión de todos los componentes mencionados, incluyendo un condensador que enlaza los dos convertidores, un diodo Schottky de seguridad y varios condensadores de desacoplo. A partir de este esquema se ha diseñado la placa de circuito impreso para la implementación física de la plataforma. Además, para minimizar el número de conexiones y también a modo de seguridad se ha implementado un plano de masa que cubre las dos caras de la PCB. Todos los componentes se han dispuesto en la cara superior de la placa a excepción del sensor de corriente, que para evitar el aumento de la resistencia a medir debido a la impedancia de las pistas se ha colocado en la cara inferior, justo al lado de a la resistencia *shunt*. La figura 9 muestra el diseño de la PCB realizada, donde las conexiones rojas corresponden a la cara superior de la placa mientras que las azules se encuentran en la inferior. Las diferentes partes que forman el sistema se han distribuido de la forma más lógica posible, intentando que la separación entre los componentes sea mínima, pero sin intentar minimizar espacio al máximo por comodidad para que los estudiantes puedan trabajar sobre el prototipo (y testarlo) sin problemas importantes.

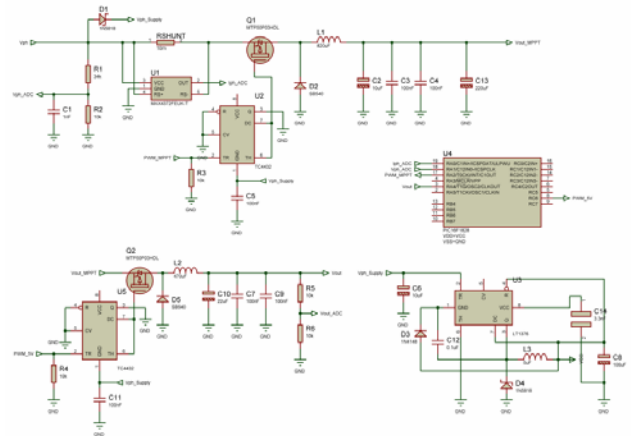


Fig. 8. Esquema completo del sistema de recolección de energía.

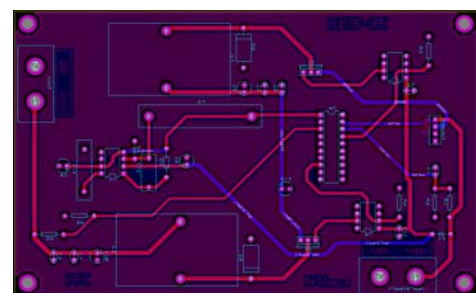


Fig. 9. Diseño de la PCB realizada, donde las conexiones rojas corresponden a la cara superior de la placa mientras que las azules se encuentran en la inferior.

La figura 10 muestra una fotografía del prototipo de la plataforma de recolección y gestión de energía implementada. Una vez obtenida la plataforma física se ha comprobado el funcionamiento del hardware principal a partir de una fuente de alimentación y un generador de funciones para simular la función del panel solar y del microcontrolador. Después la atención se ha centrado en

la programación del microcontrolador. Con el fin de depurar errores de programación, el programa se ha dividido en dos bloques principales: la modulación PWM y la conversión AD. Mediante pequeños *tests* funcionales se ha verificado que tanto la configuración de las dos salidas PWM como la conversión de las tres entradas analógicas fueran correctas. Posteriormente, se han ensamblado ambas partes y se ha comprobado el funcionamiento del programa completo en la plataforma física.

Por otro lado, y como test funcional definitivo, se ha comprobado el algoritmo P&O de seguimiento del MPP mediante el panel fotovoltaico. Para ello se han simulado diferentes intensidades de irradiancia solar y se ha verificado el correcto funcionamiento de la plataforma recolectora y gestora de energía.

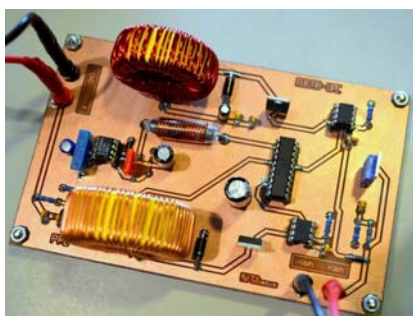


Fig. 10. Plataforma de recolección y gestión de energía implementada.

6. Conclusiones

El presente artículo muestra el diseño e implementación física de una plataforma recolectora y acondicionadora de energía práctica para aplicaciones docentes en el campo del ‘*energy harvesting*’. Además de la recolección de energía, mediante la realización de la presente plataforma, el proyecto permite al estudiante adentrarse en temáticas tales como el seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT) de paneles o células solares, control de convertidores conmutados, etc.

Se ha comprobado la importancia de la gestión de la energía proveniente del medio dada la limitación que presentan los dispositivos recolectores actuales. Es por ello que algoritmos como el de seguimiento del punto de máxima potencia son de vital importancia, así como la elección de componentes que conlleven una mínima disipación de potencia.

La plataforma ha sido diseñada en relación al tamaño y la potencia del panel solar descrito, pero es práctica para cualquier panel de características similares o inferiores. Las posibles mejoras o modificaciones que podrían realizarse en la plataforma de recolección diseñada van estrechamente ligadas a la finalidad de la misma. Podría ser implementado, por ejemplo, un subsistema de almacenamiento de energía que permitiera alimentar una carga concreta en momentos de baja o nula irradiancia solar. No obstante, sólo tendría sentido si la asincronía en la alimentación de la aplicación fuera crítica. El sistema

también puede ser adaptado a un panel fotovoltaico de otras características. En cualquier caso, el factor determinante es la corriente que se debe gestionar, la cual depende, exclusivamente, de la aplicación a la cual va destinada.

Este trabajo se ha diseñado para un amplio rango de aplicaciones, pudiendo soportar un amperaje relativamente elevado. En el supuesto de conocer la corriente necesaria para una aplicación concreta, la plataforma recolectora podría ser adaptada al mismo. Teniendo en cuenta que las aplicaciones *energy harvesting* son generalmente de muy baja potencia, las dimensiones y el coste de la plataforma disminuirían de forma considerable. En definitiva, con la realización de este trabajo se ha querido formar parte del desarrollo que viven actualmente este tipo de sistemas debido a la demanda y la proyección de futuro que presentan muchas de sus aplicaciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno Español mediante la CICYT del Ministerio de Ciencia e Innovación, gracias al proyecto TEC2010-15765 (subprograma MIC).

Referencias

- [1] Joe-Air J., Tsong-Liang H., Ying-Tung H. y Chia-Hong C., *Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems*. Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 8, No 2, pp. 147-153 (2005).
- [2] M.M. Rashid, Riza Muhida, AHM Zahirul Alam, Habib Ullah y Banna Kasemi, *Development of Economical Maximum Power Point Tracking System for Solar Cell*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(5): 700-713, 2011.
- [3] P. C. M. Bernardo, Z. M. A. Peixoto and L.V. B. Machado Neto, *A High Efficient Micro-controlled Buck Converter with Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'09), Valencia (Spain), 15th to 17th April, 2009.
- [4] Skinner P.E. y Jeffrey R., *Atmel AVR-Based Constant Current Supply*. Atmel Applications Journal. <http://www.atmel.com/> (accessed September 24, 2011).
- [5] Sobrino Duarte, Eloy, *Sistema de Regulación Fotovoltaico Basado en un Microcontrolador*, Barcelona, 27-jun-2008.
- [6] Charais, John, *Maximum Power Solar Converter*. Microchip Application AN1211, 2010 Microchip Technology Inc.
- [7] Predko, Myke, *123 PIC Microcontroller Experiments for the Evil Genius*, TAB Books Inc, July 1, 2005.
- [8] Martínez, Herminio, *Teoría de Microcontroladores PIC*. Notas de clase de la asignatura “Electrónica para Audio, Vídeo y Comunicaciones”.